

Dimensionnement d'un empennage d'avion



Activités proposées

Présentation de l'épreuve et consignes

Cette épreuve, d'une durée totale de 4 heures, n'est pas une épreuve écrite. Il n'est donc pas demandé de rédiger un compte-rendu.

Cette épreuve s'articule en trois parties clairement identifiées dans le texte.

Consignes pour la première partie

À la fin de la première partie, d'une durée d'environ 45 minutes à 1 heure, un exposé d'une durée maximale de 5 minutes est demandé. Cet exposé doit permettre de présenter le support et la problématique et mettre en évidence l'écart existant entre les performances attendues du support et les performances mesurées lors de cette première partie.

Pendant le temps de préparation de cette première partie, il ne faut pas hésiter à faire appel à un examinateur en cas de problème (lors de l'utilisation du système, incompréhension des questions posées ou des manipulations proposées...).

Il n'est pas demandé de répondre aux questions obligatoirement dans l'ordre proposé.

Un échange avec l'examineur suivra l'exposé. La présentation prête, le signaler à l'examineur et poursuivre, sans attendre, l'étude.

Consignes pour la deuxième partie

Pendant la deuxième partie, les activités proposées permettront de :

- vérifier les performances attendues d'un système complexe ;
- construire et valider, à partir d'essais, des modélisations d'un système complexe ;
- et prévoir des performances d'un système complexe en vue d'imaginer et choisir des solutions d'évolution répondant à un besoin exprimé.

Durant cette partie, il est demandé de préparer les réponses aux activités proposées en suivant l'ordre imposé et les indications du texte.

Consignes pour la troisième partie

Au cours de l'interrogation, des éléments seront fournis pour permettre de construire une synthèse finale quel que soit le nombre d'activités abordées.

Quel que soit l'état d'avancement, les 30 dernières minutes de l'épreuve sont consacrées à la dernière partie visant à l'élaboration de la synthèse finale. Cette synthèse de fin d'épreuve (3 minutes de présentation maximum) est globale. Elle est présentée pendant le dernier quart d'heure de l'épreuve et doit permettre de :

- conclure quant à la problématique abordée dans le TP ;
- préciser la ou les démarche(s) adoptées pour répondre au problème posé ;
- et montrer votre capacité à utiliser les résultats obtenus (simulés ou mesurés) pour décider et choisir une évolution technique en rapport avec un cahier des charges.

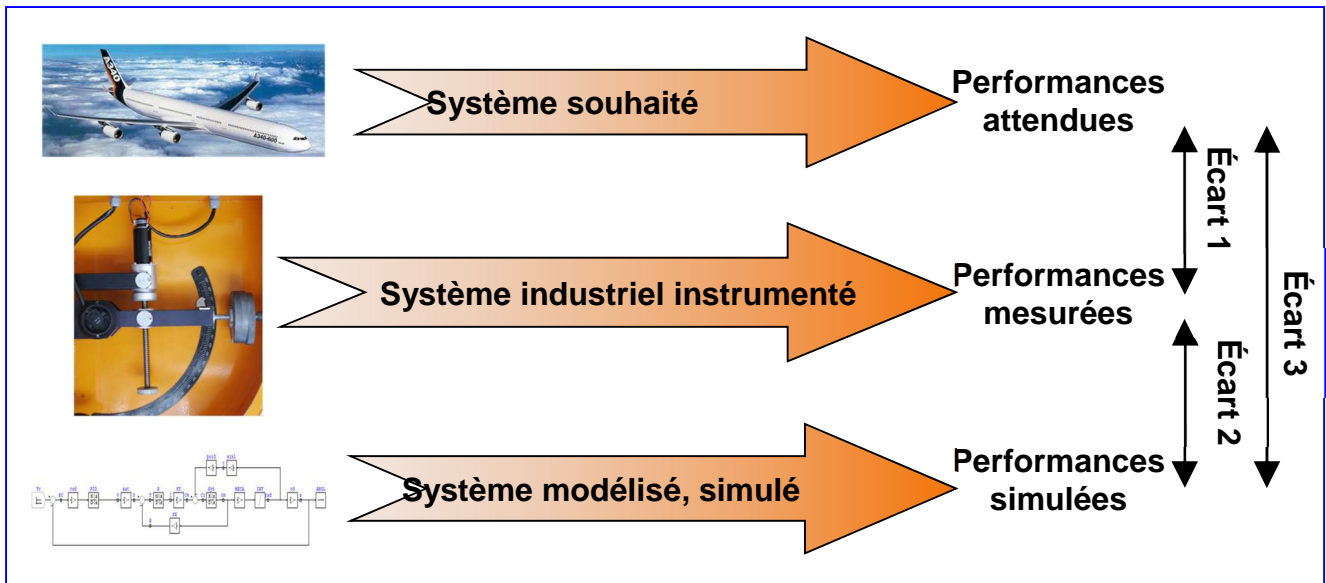
Consignes générales

Lors de cette épreuve, la qualité de la prestation orale est évaluée.

Pour illustrer la présentation, des dessins, schémas et graphes, élaborés avec soin pourront être utilisés.

Rappels de la démarche d'ingénieur

Durant cette épreuve, le candidat sera amené à s'inscrire dans la démarche de l'ingénieur d'analyse et de résolution de problèmes sur un système complexe industriel, qui se représente symboliquement par le schéma suivant :



Cette démarche consiste à vérifier les **performances attendues** d'un système complexe (quantification de l'écart 1), à **valider une modélisation** à partir d'expérimentations (quantification de l'écart 2) et à **prévoir les performances** d'un système à partir d'une modélisation (quantification de l'écart 3).

À chaque fois que cela lui sera demandé, le candidat devra indiquer le système sur lequel il travaille (système souhaité, système réel en utilisation ou système simulé) et l'écart qu'il quantifie.

Au cours de la synthèse finale, le candidat pourra s'appuyer sur ce schéma, s'il le juge utile.

Pour l'ensemble de vos études, vous disposez du matériel suivant :

- Ce présent texte de TP avec les annexes
- Le système MAXPID et son logiciel de commande associé
- Deux modélisations schéma-bloc du système Maxpid sous le logiciel Scilab
- Un environnement de développement pour Python
- L'environnement de développement Scilab

Première partie

Objectifs : Dans cette première partie, les activités proposées ont pour objectif de s'approprier le support matériel du TP, la problématique du TP, et de vérifier les performances attendues d'un système complexe.

1. Présentation de la problématique proposée

1.1. Contexte : étude d'un empennage d'avion

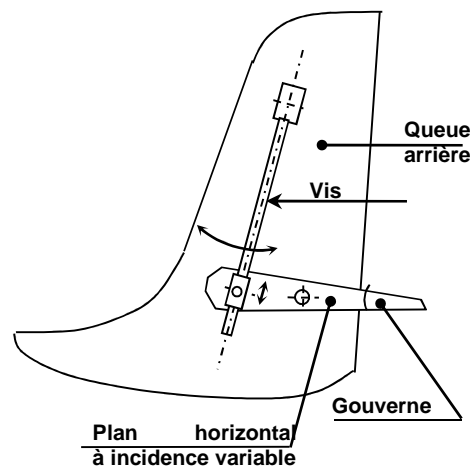
L'empennage d'un avion peut être assimilé à une mini aile située à l'extrémité du fuselage de l'avion. Il subit donc, comme la voilure principale, une force de portance et une force de traînée appliquées en son centre de poussée.

Un empennage est composé de deux parties :

- la première, plan horizontal et gouverne, assure la stabilité en profondeur de l'avion,
- la deuxième, queue arrière, assure la stabilité en direction.

Nous nous intéressons dans ce sujet au système qui permet d'asservir en position l'ensemble plan horizontal et gouverne.

La commande en position du plan horizontal est assurée par un vérin à vis, dont le schéma cinématique est donné en Annexe 2. La rotation de cette vis entraîne la translation d'un écrou qui permet le déplacement du plan horizontal.



1.2. Commande en position du PHR

La consigne d'inclinaison du PHR vis-à-vis de l'horizontal est donnée par le pilote de l'avion par action sur un levier de commande. Un calculateur convertit cette consigne en signal électrique afin de pouvoir comparer la consigne à l'image de l'angle d'inclinaison du PHR donné par un capteur de position angulaire. L'écart est alors traité par un régulateur réalisé sous forme numérique qui génère un nombre représentant la grandeur de commande d'une servovalve qui pilote un moteur (la tendance actuelle consiste à remplacer les moteurs hydrauliques par des actionneurs électriques). Le moteur entraîne en rotation une vis à bille. La rotation de celle-ci provoque la translation d'un écrou en liaison pivot avec le PHR et donc la rotation du PHR, lui-même en liaison pivot avec le fuselage de l'avion.

L'ensemble comparateur et régulateur numérique est désigné par la suite sous le terme boîtier de commande du PHR.

1.3. Problématique

Pour un constructeur aéronautique, il est intéressant lors de la conception d'un nouvel avion d'utiliser un maximum d'éléments provenant d'une solution déjà validée sur un appareil précédent. L'objectif de ce TP est d'étudier la possibilité de conserver le même boîtier de commande du PHR pour des avions différents utilisant des plans horizontaux réglables de tailles différentes et donc de caractéristiques cinétiques différentes.

Ainsi le but de ce TP est, dans un premier temps, d'observer et de caractériser les performances de l'asservissement en position d'un PHR en fonction de ses caractéristiques cinétiques et, dans un second temps, de proposer un régulateur dont les caractéristiques permettent d'obtenir pour le système des marges de phase quasiment constantes malgré les variations des caractéristiques cinétiques.

Toute l'étude qui suit sera menée sur le système MAXPID à votre disposition. Ce système possède une cinématique et une boucle de commande analogues à celle du PHR.

Dans tout le TP, il est considéré que l'action de la portance sur le PHR compense exactement l'effet de la pesanteur sur celui-ci. Pour cette raison, le plan d'évolution du bras Maxpid sera horizontal pour toutes les manipulations

1.4. Description de l'étude

Cette étude se décompose en quatre phases.

- Une première étape porte sur l'analyse système dont l'objectif est de mieux appréhender l'ensemble du procédé et les différents éléments fonctionnels qui le composent.
- Une deuxième étape a comme objectif la modélisation de la chaîne de motorisation de l'empennage, en particulier de la partie mécanique associée.
- La troisième étape porte sur la détermination des grandeurs caractéristiques de la chaîne d'asservissement. Cette étape doit permettre de définir et de déterminer les modèles nécessaires à l'étude.
- Enfin la quatrième étape porte sur le réglage du correcteur afin de répondre au cahier des charges (stabilité, précision, rapidité).

2. Prise en main et analyse structurelle

Activité 1:

- En vous aidant du diagramme BDD donné en annexe 1 du document ressource, identifier les constituants du Maxpid.
- A l'aide d'un schéma adapté vous présenterez les chaînes d'énergie et d'information ainsi que les différents flux mis en œuvre dans le bras Maxpid.

Activité 2:

- Lister les différents écarts entre le système Maxpid et l'empennage d'avion réel ("écart 1").
- Comparer plus particulièrement les deux cinématiques à l'aide d'un schéma cinématique du système MaxPID (voir annexe 3).

- Consulter le Document ressource en annexe 8 sur l'utilisation du logiciel Maxpid.

Activité 3:

A partir des documents fournis en annexes (1,6,8), analyser et expliquer le principe de mesure de la position du bras. On s'intéressera en particulier :

- Au principe physique de la mesure
- A la nature de l'information traitée par le régulateur
- A la résolution de la mesure (quelle est la plus petite variation de position mesurable ?)
- On précisera la valeur de K_{cap} le gain de la chaîne de mesure (voir figure 1 en annexe 1).

Activité 4:

- En vous aidant de la documentation du logiciel, régler les paramètres du correcteur tel que le gain proportionnel soit de 150 et le gain intégral de 11, réaliser un essai afin d'observer la réponse indicielle du bras à un échelon de 3° autour de la position $\theta = 20^\circ$ sans masses additionnelles puis avec 4 masses additionnelles. Conclure sur l'influence des masses additionnelles sur la stabilité, la précision et la rapidité du système.

Activité 5:

- A l'aide des éléments obtenus, et en faisant référence au schéma mettant en évidence les écarts de la démarche de l'ingénieur, proposer une conclusion sur l'étude menée au cours de cette partie
- Dès que votre intervention orale est prête, le signaler à l'examineur, puis passer à la suite sans attendre.

Deuxième partie

3. Détermination des paramètres des chaînes fonctionnelles

Objectifs : déterminer les paramètres permettant d'élaborer un modèle complet dit modèle de synthèse du Maxpid

3.1. Détermination des paramètres cinématiques

Activité 6:

- A l'aide de l'annexe 2, déterminer une relation entre l'angle de rotation du bras θ et la translation de l'écrou x . En déduire une relation entre l'angle de rotation du moteur β et l'angle de rotation du bras θ .

Activité 7:

- A l'aide de Python ou Scilab, définir et programmer une fonction « loi_geometrique » permettant d'obtenir β en fonction de θ . Tracer l'évolution de β en fonction de θ pour un angle de rotation du bras variant de 0° à 90° .
- Vérifier la courbe obtenue à l'aide du logiciel du bras Maxpid si nécessaire.

On approche la loi obtenue par une fonction polynomiale de degré 2 : $\beta = a\theta^2 + b\theta + c$
Pour déterminer les coefficients optimaux de cette relation, on utilise la méthode des moindres carrés rappelée ci-dessous :

La méthode des moindres carrés consiste à déterminer la fonction $f(\theta) = a\theta^2 + b\theta + c$ qui minimise la somme quadratique des déviations des valeurs exactes donnée par la loi géométrique aux prédictions de $f(\theta)$. Si par exemple, nous prenons N valeurs calculées par la loi, $(\beta_i)_{i=1, \dots, N}$ pour (θ_i) valeurs, les paramètres (a, b, c) « optimaux » au sens de la méthode des moindres carrés sont ceux qui minimisent la quantité : $S(a, b, c) = \sum_{i=1}^N (\beta_i - (a \cdot \theta_i^2 + b \cdot \theta_i + c))^2 = \sum_{i=1}^N r_i^2(a, b, c)$ où les termes $r_i(a, b, c)$ sont les résidus au modèle, i.e. les écarts entre les points calculés exacts β_i et ceux donnés par le modèle $f(\theta)$. $S(a, b, c)$ peut être considéré comme une mesure de la distance entre les données calculées exactes et le modèle approché qui prédit ces données. La prescription des moindres carrés commande que cette distance soit minimale.

Il suffit donc de dériver cette fonctionnelle par rapport aux paramètres inconnus a, b et c pour obtenir un système d'équations à résoudre de manière à calculer les paramètres optimaux.

Activité 8:

- Mettre en place une fonction « moindres_carres » qui utilise la fonction définie précédemment et qui renvoie les trois paramètres optimaux a, b, c . On choisira le nombre de points N comme paramètre de la fonction. Les angles seront compris entre 0 et 90° .

Activité 9:

- Déduire des valeurs a,b,c l'expression du gain du mécanisme K_{meca} . Donner ce gain autour des points de fonctionnement $\theta = 80^\circ$ et $\theta = 20^\circ$. Vérifier graphiquement le résultat obtenu.
- Comparer les deux valeurs obtenues. Que peut-on en déduire sur la modélisation de la chaîne cinématique par un SLI (Système Linéaire Invariant dans le temps) ? Le système est-il linéaire ? Est-il invariant dans le temps ?

3.2. Modélisation de la chaîne d'énergie

L'ensemble « Convertisseur-amplificateur » décrit précédemment et représenté sur la figure 1 de l'annexe 1 comporte un élément non linéaire, de type saturation, qui limite la valeur de la grandeur de sortie de cet ensemble.

Activité 10:

- A l'aide d'un essai, mettre en évidence la présence de cette non-linéarité et en déterminer la valeur caractéristique.

Activité 11:

- Observer à l'oscilloscope pour une commande de 0 à 90° avec un gain proportionnel du correcteur de 150, l'allure de la tension aux bornes du moteur.
- Tracer en parallèle l'allure de cette tension sous le logiciel du Maxpid. Commenter les courbes obtenues.

Activité 12:

- A partir d'une mesure en boucle fermée et en réglant le correcteur PID du Maxpid de façon à avoir uniquement un gain proportionnel $K_p=10$, proposer un protocole permettant de déterminer le gain de l'amplificateur K_a (voir figure 1 annexe 1).

3.3. Détermination de J_{eq} ramenée à l'arbre moteur

Activité 13:

- A l'aide d'hypothèses simplificatrices que vous préciserez, montrer que l'inertie équivalente ramenée à l'arbre moteur peut se mettre sous la forme :

$$J_{eq} = J_0 + J_1 k_\alpha(\theta)^2 + J_2 k_{meca}(\theta)^2 + J_3 k_x^2$$

avec $k_\alpha(\theta) = \frac{\dot{\alpha}(t)}{\omega}$ où α désigne l'angle de rotation de l'ensemble {moteur + vis} autour de l'axe orthogonale au plan d'évolution du bras MaxPID ;
et où k_x désigne le rapport entre la vitesse de translation de l'écrou et la vitesse de rotation de la vis.

La formule indiquée à la question précédente permet d'estimer l'inertie équivalente ramenée à l'arbre moteur pour $\theta=20^\circ$ et lorsque le bras ne comporte aucune masse additionnelle : on obtient alors $J_{eq}^0(20) = 5,03 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$.

Activité 14:

- Déterminer l'inertie équivalente $J_{eq}^4(20)$ pour le même angle lorsque le bras comporte 4 masses additionnelles.

3.4. Modélisation de la motorisation

Activité 15:

- A partir des équations du moteur à courant continu (annexe 4), tracer le schéma bloc détaillé du moteur en prenant comme entrée $U(p)$ et comme sortie $\Omega_m(p)$. Le candidat prendra garde à ne faire figurer dans ce schéma bloc que des fonctions de transfert causales.

Activité 16:

- A l'aide de l'annexe 5, déterminer les valeurs numériques de K_e , K_c , R et L (on rappelle que la référence du moteur est Maxon RE035G-118778).

On choisit dans ce modèle de modéliser les frottements sous la forme d'un couple résistant C_r ramené à l'arbre moteur de la forme $C_r = C_0 + f_v \cdot \omega_m$ où C_0 est un couple de frottement sec constant.

Activité 17:

- Ecrire l'équation reliant le couple moteur et le couple résistant ramené à l'arbre moteur en fonction de la vitesse de rotation.
- Que devient cette équation lorsque la vitesse de rotation est constante ?
- A partir d'essais sur le système avec 2 masses embarquées et à l'aide d'une consigne de vitesse en trapèze, déterminer le couple résistant pour quatre vitesses de rotation de la vis.

Régler le correcteur PID du maxpid de façon à avoir $K_p=100$.

Dans le cas où le message « Dépassement erreur de poursuite maximale atteinte » s'affiche, il est nécessaire d'augmenter la valeur admissible de cette erreur en cliquant sur l'icône PID.

Activité 18:

- Déterminer les coefficients C_0 et f_v moyens à partir de ces essais.

3.5. Validation de la modélisation

La figure 3 présente le modèle de validation implanté sous le logiciel Scilab. Pour le visualiser, ouvrir le fichier maxpid_validation.zcos. Ce modèle tient compte de la saturation de la commande et des non-linéarités de l'inertie équivalente et du coefficient K_{meca} . Il tient également compte des frottements et de la position initiale du bras. Le coefficient K_{cal} est un coefficient permettant de recalibrer le modèle de validation. Il est par défaut fixé à 1. Les blocs rd et d2r permettent les conversions respectivement de radians en degrés et de degrés en radians.

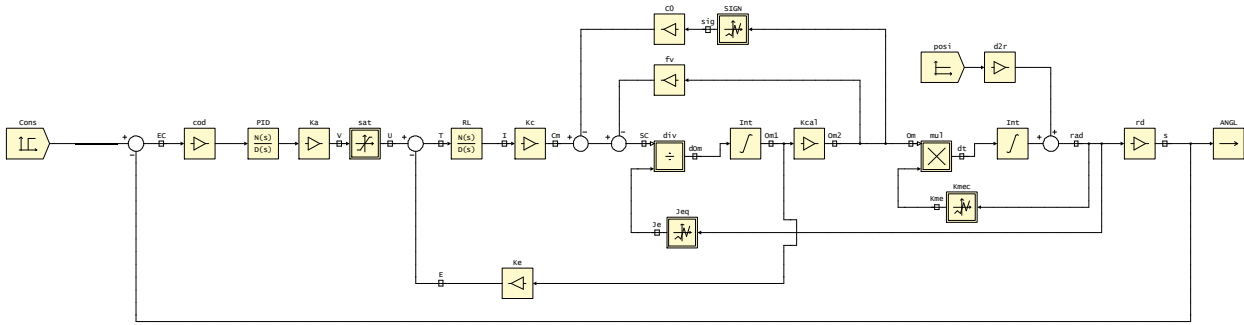


Figure 3 – Modèle de validation

Pour simuler le fonctionnement du bras avec 4 masses embarquées, double cliquer sur le bloc Jeq. Effacer les données puis cliquer sur lire et sélectionner le fichier Jeq4.txt. Pour simuler le fonctionnement sans masse embarquée, procéder de la même façon mais choisir le fichier Jeq0.txt. L'annexe 7 fournit une aide à l'utilisation du logiciel Scilab.

Activité 19:

- Identifier les différents éléments du schéma bloc proposé et justifier la nécessité de prendre en compte la position initiale. Compléter le modèle de validation du Maxpid sous Scilab (valeurs à compléter dans le menu contexte accessible par un clic droit sur le fond blanc : Kcapt, Usat, Ke, Kc, R et L, C0 et fv).

Activité 20:

- Comparer les résultats fournis par le modèle et le système Maxpid à l'aide d'un essai de votre choix (comparer le temps de réponse, le dépassement et la valeur finale). Afin de mieux faire coïncider les résultats, modifier la valeur du coefficient Kca1 de plus ou moins 20% en fonction des résultats précédents et faire une nouvelle comparaison entre modèle et réel.

4. Synthèse d'un régulateur

Objectif :

Un modèle dit de validation est utilisé pour choisir et dimensionner un régulateur convenable vis-à-vis de la minimisation de l'influence des masses.

Le système Maxpid permet seulement l'implantation de régulateurs de type P, PI, PID. Pour tout autre type de régulateur, il est nécessaire d'établir un modèle de validation. Ce modèle doit être le plus réaliste possible, doit inclure les éléments non linéaires et doit être recalé expérimentalement.

En revanche, le calcul des paramètres du régulateur nécessite un modèle linéaire dit modèle de synthèse. Ce modèle de synthèse utilise un modèle de comportement issu du modèle de validation par simplification en négligeant des phénomènes physiques et/ou en faisant des hypothèses sur les non-linéarités.

La figure 4 présente le modèle de synthèse obtenu à partir du modèle de validation en linéarisant les caractéristiques non-linéaires et en ne tenant pas compte des phénomènes

de saturation et de frottements secs. Pour le visualiser ouvrir le fichier maxpid_synthese.zcos.

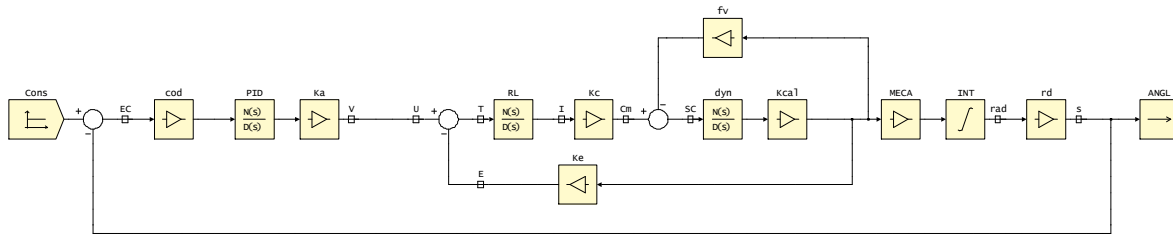


Figure 4 – Modèle de synthèse

Les paramètres du modèle sont similaires à ceux obtenus dans le modèle de validation.

Activité 21:

- Lancer une simulation et observer les diagrammes de Bode de la fonction de transfert en boucle ouverte du pour un correcteur $C(p)=1$ dans deux configurations (à vide et avec quatre masses additionnelles). Relever les marges de gain et de phases et les pulsations au gain unité pour le bras à vide et pour le bras chargé. Faire le lien avec les résultats qui pourraient être observés dans le domaine temporel avec $C(p)=1$.

On donne ici le cahier des charges techniques fixé pour la commande du PHR :

- la marge de phase de la commande du PHR doit être de 55° au moins.
- la rapidité de la commande du PHR est caractérisée par un temps d'établissement d'au plus 0,15 s.
- l'erreur statique doit être nulle.

Dans le cas d'un système bouclé convenablement amorti, on pourra utiliser, sans aucune justification, la relation : $t_e \cdot \omega_{0dB} = 3$ où ω_{0dB} désigne la pulsation de coupure à 0 dB en boucle ouverte et t_e le temps d'établissement en boucle fermée vis-à-vis d'un échelon de consigne :

- $t_e=t_m$, temps du 1^{er} maximum si le dépassement est supérieur à 5%,
- $t_e=t_R$, temps de réponse à 5% si le dépassement est inférieur à 5%.

Activité 22:

- Justifier le choix d'un régulateur à avance de phase pour satisfaire le cahier des charges. Le choix d'un régulateur proportionnel ou proportionnel intégral permettrait-il de satisfaire le cahier des charges ?

La fonction de transfert du correcteur à avance de phase est notée : $C(p) = K_{ap} \frac{1+aTp}{1+Tp}$.

avec $a > 1$.

Activité 23:

- Proposer une méthodologie de réglage de ce correcteur compte tenu du cahier des charges précédent..

Troisième partie

5. Activités de synthèse finale (30 dernières minutes)

Objectifs :

Les paramètres du régulateur étant choisis, on cherche à analyser l'influence des masses sur le comportement du système

Un réglage des valeurs numériques des paramètres, K_p , T et a , du correcteur à avance de phase sera proposé par l'examineur pour aborder cette partie de l'étude.

On rappelle les critères du cahier des charges technique fixé pour la commande du PHR :

- la marge de phase de la commande du PHR doit être de 55° au moins.
- la rapidité de la commande du PHR est caractérisée par un temps d'établissement d'au plus 0,15 s.
- l'erreur statique doit être nulle.

Activité 24:

- **Implanter ce correcteur dans le schéma-bloc du modèle de synthèse et vérifier la marge de phase obtenue. Commenter les autres critères du cahier des charges**

Activité 25:

- **Vérifier à l'aide du modèle de validation que le régulateur proposé permet bien de répondre au cahier des charges à partir du tracé de la réponse temporelle**

Activité 26:

- **Commenter l'influence des masses sur la réponse du bras. Conclure sur la problématique exposée en début de sujet. En vous appuyant sur les différents points abordés, proposez une synthèse à l'ensemble de l'étude.**

Activité 27:

- **Pour chacune des activités des parties 2, 3, ... préciser où elle s'intègre dans la démarche de l'ingénieur. Justifier la pertinence de la démarche adoptée vis à vis des objectifs visés.**